

OLAGS

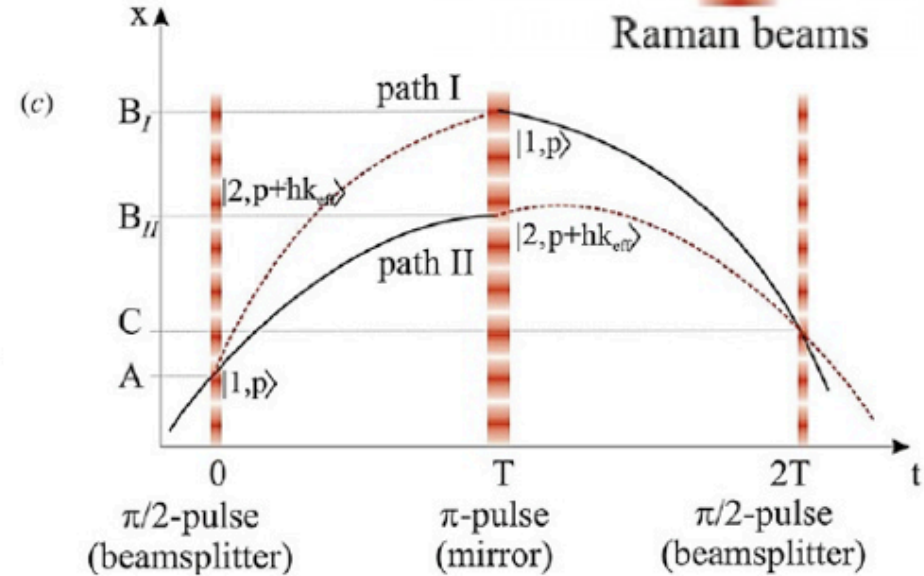
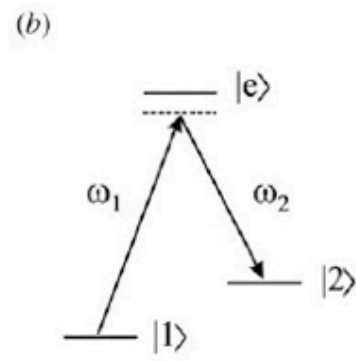
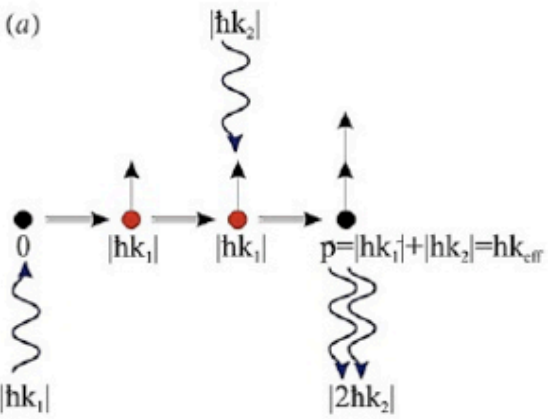
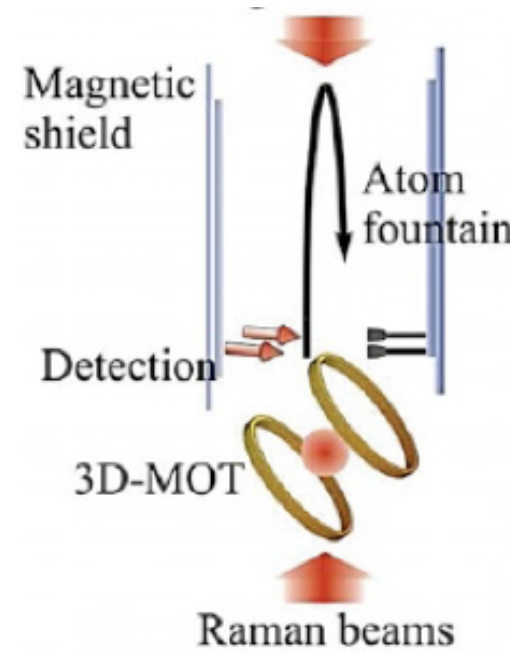
Optical Links for Atomic Gravity Sensors

CdS preventivi
Genova 16/07/2020

F. Sorrentino

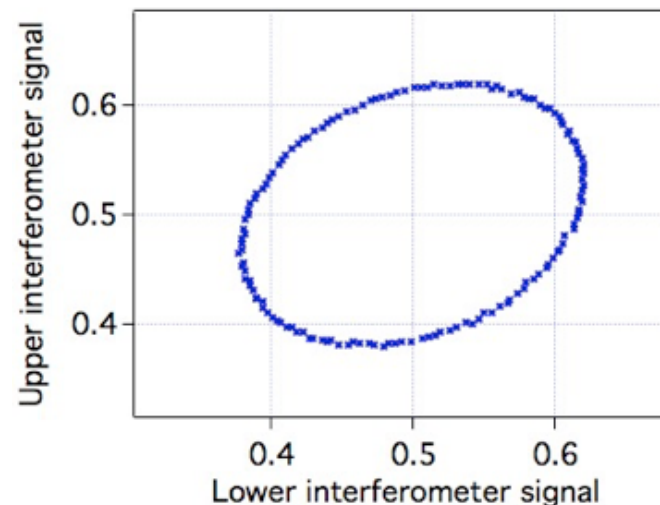
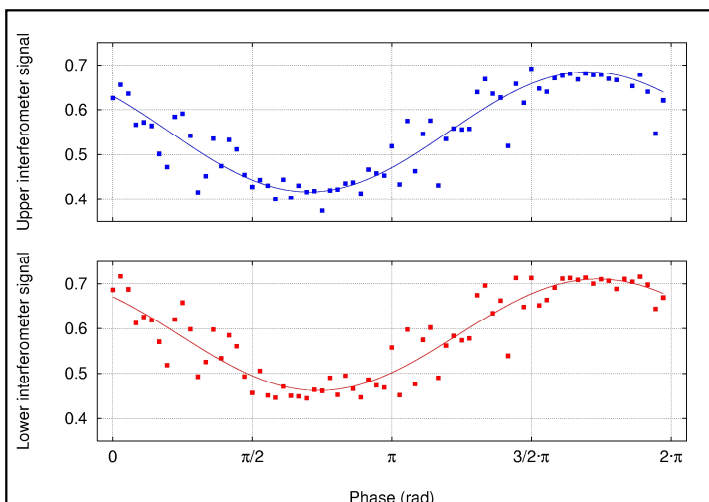
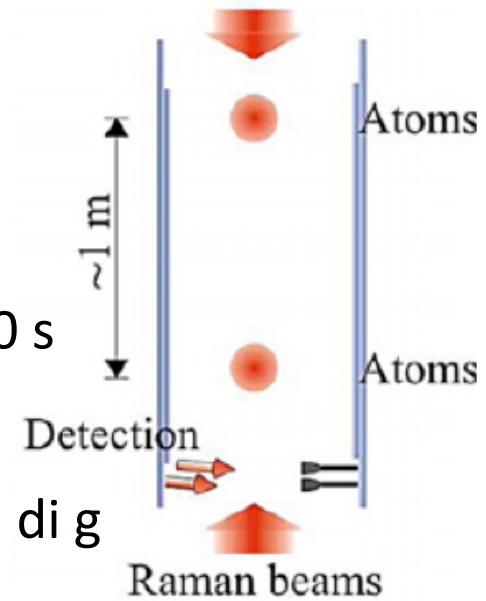
Gravimetri atomici

- Sono basati sull'interferometria atomica: laser cooling + manipolazione coerente di pacchetti d'onda atomici
- Sono i migliori gravimetri assoluti: dimostrate sensibilità dell'ordine di $10 \mu\text{gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, accuratezza $\sim 1 \mu\text{gal}$ ($1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$)
- Il rumore sismico è uno dei principali limiti di sensibilità



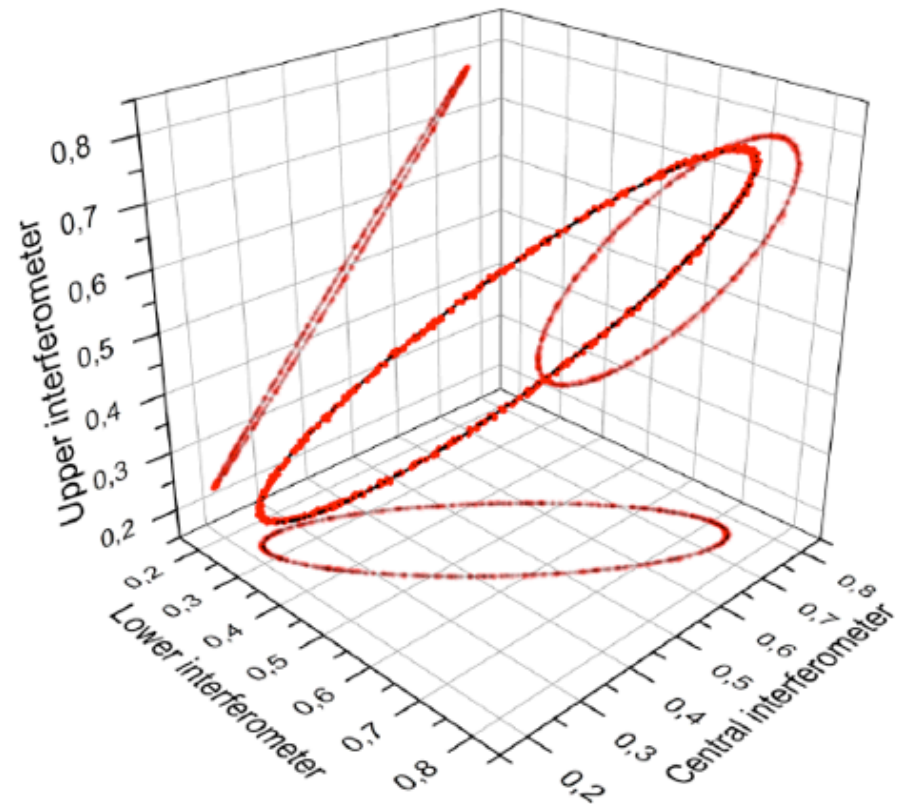
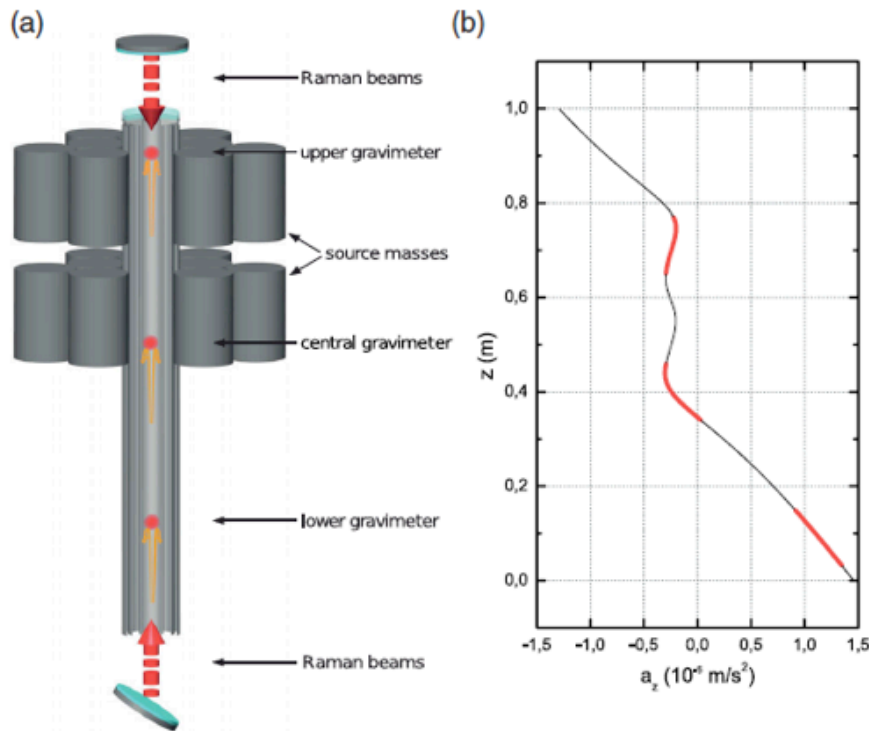
Gradiometri gravitazionali

- Due campioni atomici separati verticalmente
- Interrogazione con lo stesso campo laser per la manipolazione del pacchetto d'onda atomico
- Dimostrato un CMRR migliore di 140 dB per rumore sismico
- Sensibilità differenziale dimostrata di $5 \cdot 10^{-11}$ g @10000 s con baseline di 30 cm
 - [F. Sorrentino et al., Phys. Rev. A **89**, 023607 (2014)]
- L'uso di due nuvole atomiche migliora anche la misura di g
 - F. Sorrentino et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 114104 (2012)



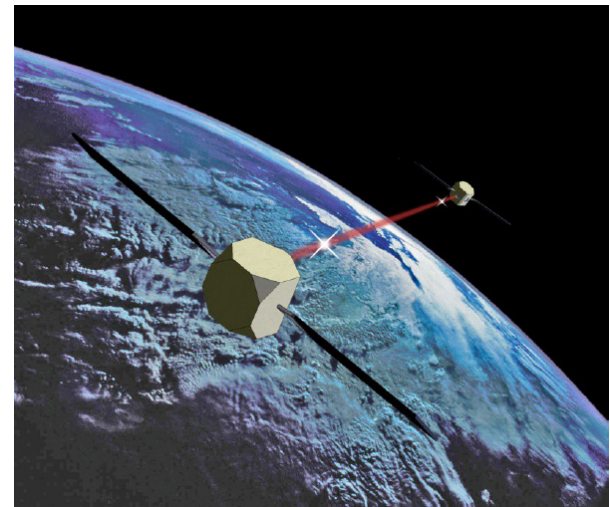
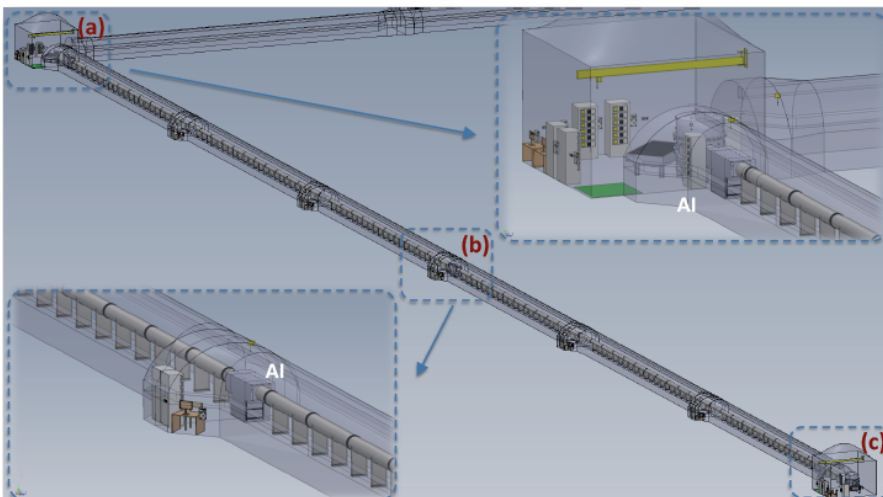
Scalabilità dei gradiometri

- Con $n+1$ campioni atomici equispaziati si misura la derivata spaziale n -sima del campo gravitazionale
- Dimostrato ad es. per la misura della curvatura del campo gravitazionale
 - F. Sorrentino et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 114104 (2012)



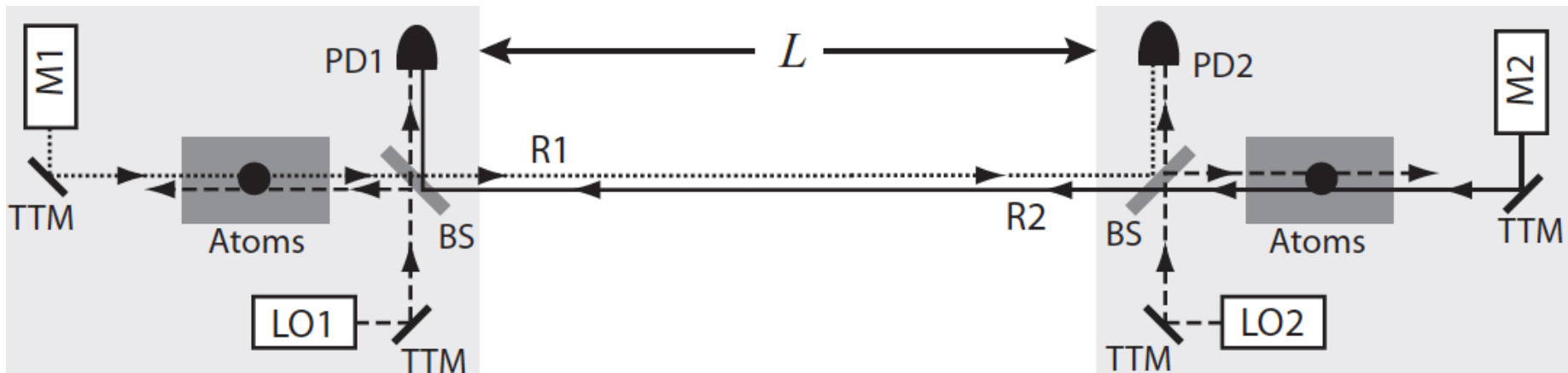
Scalabilità dei gradiometri

- Con $n+1$ campioni atomici equispaziati si misura la derivata spaziale n -sima del campo gravitazionale
- Dimostrato ad es. per la misura della curvatura del campo gravitazionale
 - F. Sorrentino et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 114104 (2012)
- La sensibilità nella misura di gradiente dipende dalla distanza tra i sensori
 - Misure ultra-sensibili richiedono apparati di grandi dimensioni
 - Fontane verticali da ~ 10 m (Stanford, Hannover, Firenze)
 - Cavità ottica orizzontale da 300 m, (LNBB, Francia, progetto MIGA)
 - Proposte per link laser tra satelliti distanti: AGIS, AGIS-LEO, SAGE



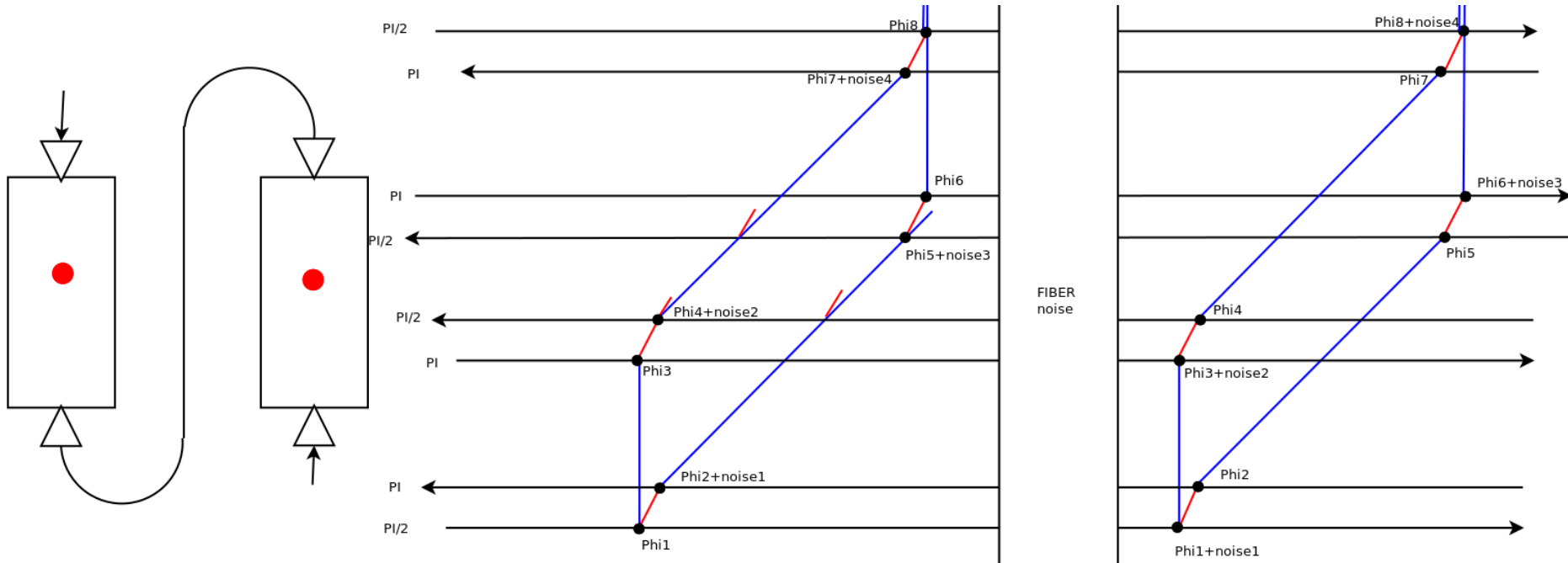
OLAGS: concetto di base

- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - CMRR elevato su grandi distanze (\sim km)
 - controllo di fronti d'onda laser
 - Link in eterodina [J. M. Hogan and M. A. Kasevich, Atom interferometric gravitational wave detection using heterodyne laser links, Phys. Rev. A 94, 033632 (2016)]



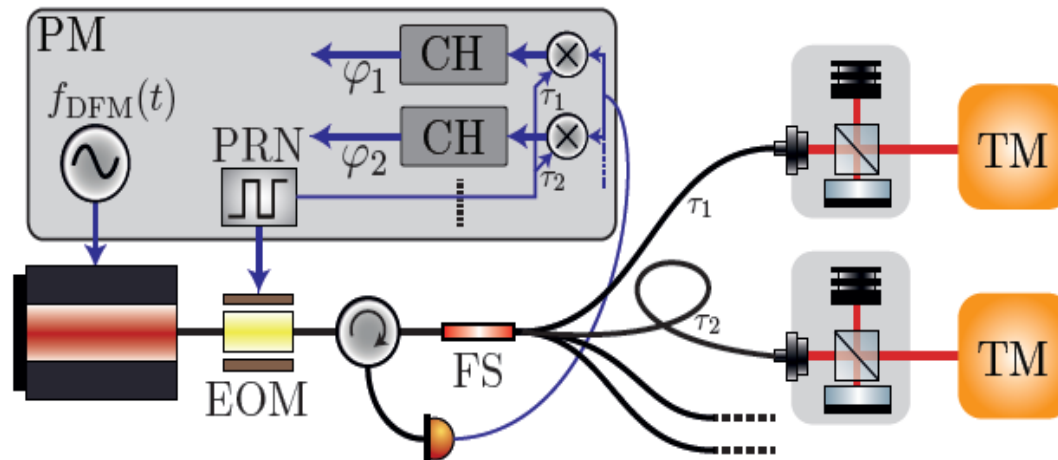
OLAGS: concetto di base

- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - Link in fibra ottica
 - Metodi di metrologia ottica per la cancellazione del rumore di fase indotto dalla fibra tramite link a due vie



OLAGS: concetto di base

- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - Link in fibra ottica
 - Metodi di metrologia ottica per la cancellazione del rumore di fase indotto dalla fibra tramite link a due vie
 - Metodi interferometrici per trasferimento di un riferimento inerziale ad una massa di test [O. Gerberding, Opt. Expr. 14753, 234267 (2015)]



La collaborazione OLAGS

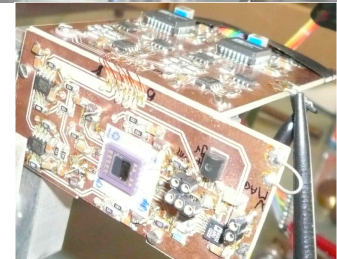
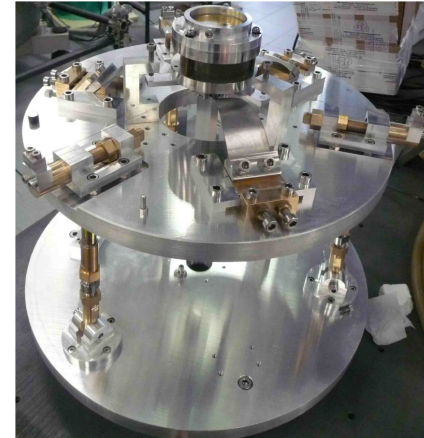
- Genova (1 FTE)
 - coord. Naz., link in fibra ottica, controllo di fronti d'onda laser, controllo dei campi magnetici, modelli per misure di rumore Newtoniano
- Firenze (1 FTE)
 - Interferometria atomica su riga di orologio ottico, metodi di ottica atomica, integrazione di link ottici e isolamento sismico su sistemi atomici
- Pisa (2.5 FTE)
 - isolamento sismico, controllo angolare, modelli per misure di rumore Newtoniano, modelli per ottica atomica con atomi intrappolati
- LNF_dtz (0.4 FTE)
 - elettronica di controllo

Struttura della proposta

- **Tecnologie per i link ottici** (GE + FI + Pi)
 - Sviluppo del link ottico in fibra; studio della topologia ottimale; *test* del principio su scala di lunghezze variabile; integrazione con sensori atomici
 - Metodi di controllo per fronti d'onda laser; nella propagazione libera su grandi distanze
- **Tecnologie di ottica atomica** (FI + PI + EGO)
 - Interferometro atomico su riga di orologio ottico; beam-splitters atomici ad alto momento trasferito; Interferometria in trappola con atomi di Sr
 - Integrazione di sistemi per isolamento sismico e controllo di fronti d'onda
- **Isolamento sismico** (PI)
 - Sistema per la riduzione del rumore di accelerazione verticale sul singolo IA
 - Controllo dell'assetto angolare e del rumore di puntamento per i fasci laser utilizzati come beam splitter per il pacchetto d'onda atomico
- **Altri sviluppi tecnologici** (LNF + GE)
 - Sistema da vuoto per l'I.A.
 - Sistema di controllo dei campi magnetici
 - Elettronica di controllo della rete
- **Modelli per misura di osservabili fisiche in ambiente terrestre** (RM3 + PI+ GE + INGV + EGO)
 - Fisica terrestre: analisi di serie temporali per caratterizzazione delle componenti di rumore, modelli per misure di osservabili geofisiche
 - Onge gravitazionali: metodi di analisi del segnale per la misura del rumore newtoniano e per rivelazione di OG sub-Hz attraverso i modi normali terrestri

Attività 2020, contributo GE, COVID-19

- Nuova sigla: attività 2020
 - Kick-off meeting 8/1/2020
 - Design globale preliminare
 - definizione interfacce tra sottosistemi
 - attività preliminari di laboratorio
 - Test preliminari per configurare la topologia del link in fibra
 - Test preliminari per il controllo angolare del sistema isolamento sismico
 - procura componenti (in ritardo per lo slittamento dei test di laboratorio preliminari)
 - Meeting di progetto 1/7/2020
- Contributo genovese
 - Coordinamento nazionale
 - Controllo link in fibra ottica
 - Contributo a sviluppo dei sistemi per isolamento sismico e controllo di fronti d'onda laser
- Impatto COVID-19
 - Ritardo di 4÷5 mesi nelle attività sperimentali



Anagrafica, servizi, richieste finanziarie

- Anagrafica:
 - B. D'Angelo (PhD) 0.5
 - G. Gemme (dir. ric) 0.1
 - F. Sorrentino (ric., resp. naz.) 0.4
- Servizi:
 - Progettazione elettronica
 - Alimentazioni per componenti banco ottico 0.5 MU
 - Progettazione meccanica
 - Componenti optomeccanici 0.5 MU
 - Officina meccanica
 - Componenti optomeccanici 0.5 MU
- Richieste finanziarie:
 - Missioni (riunioni di progetto e collab. Internaz.) 3k
 - Consumo (fibre ottiche, componenti ottici) 7k
 - Apparati (componenti optoelettronici) 5k
 - Attrezzature (sorgenti laser e modulatori) 10k

Slides di riserva

OLAGS: concetto di base

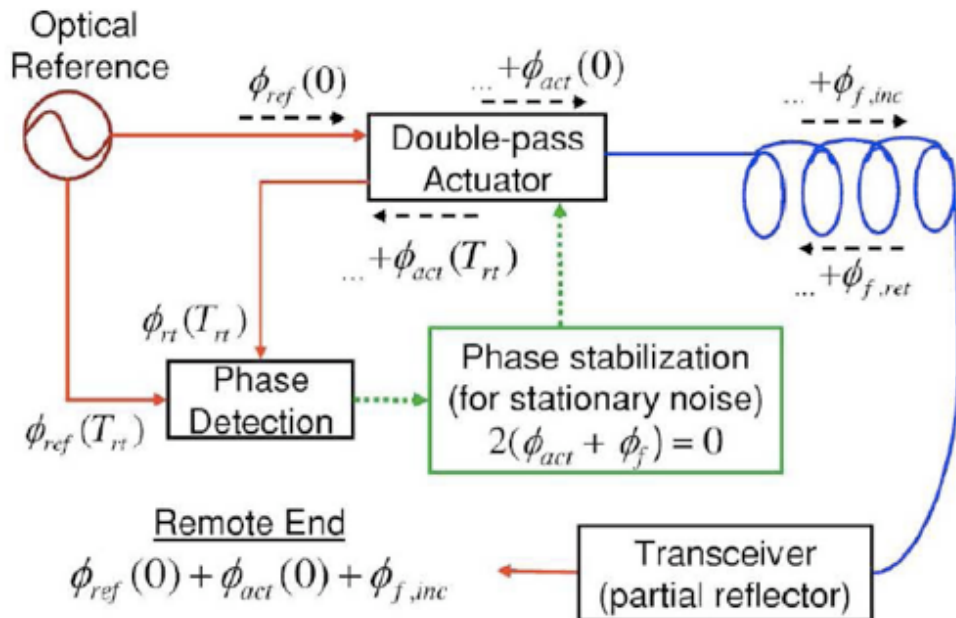
- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - Link in fibra ottica
 - Metodi di metrologia ottica per la cancellazione del rumore di fase indotto dalla fibra tramite link a due vie
 - Metodi interferometrici per trasferimento di un riferimento inerziale ad una massa di test [O. Gerberding, Opt. Expr. 14753, 234267 (2015)]
- Studiare la scalabilità della rete per:
 - numero di sensori
 - distanza tra i sensori
 - dimensioni (e sensibilità) del singolo sensore

OLAGS: concetto di base

- Dimostrare la possibilità di misurare il gradiente gravitazionale con due sensori atomici distanti
- Utilizzare lo stesso campo laser per interrogare i due gravimetri, mediante un link ottico coerente
 - Link in vuoto
 - Link in fibra ottica
 - Metodi di metrologia ottica per la cancellazione del rumore di fase indotto dalla fibra tramite link a due vie
 - Metodi interferometrici per trasferimento di un riferimento inerziale ad una massa di test [O. Gerberding, Opt. Expr. 14753, 234267 (2015)]
- Studiare la scalabilità della rete per:
 - numero di sensori
 - distanza tra i sensori
 - dimensioni (e sensibilità) del singolo sensore
- Studiare le configurazioni ottimali per specifici campi applicativi
 - Topologia della rete
 - trade-off costo/prestazioni

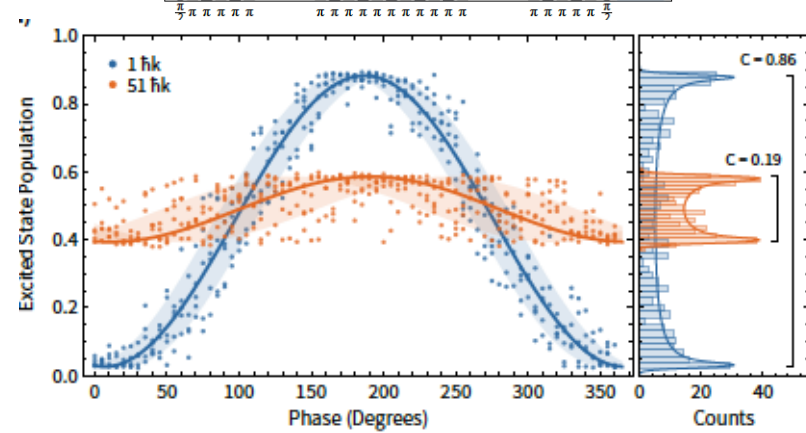
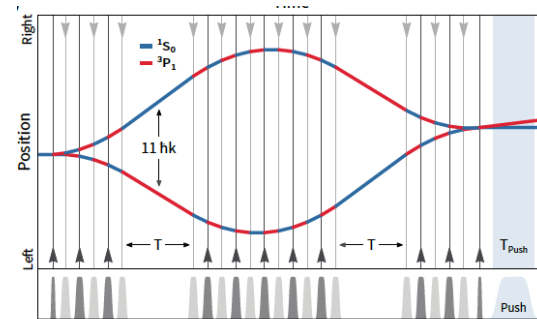
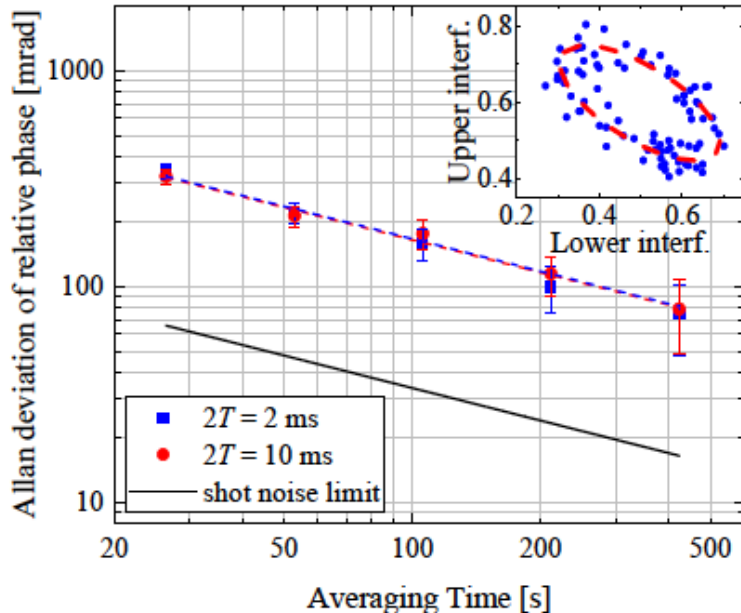
Link ottici coerenti

- Eliminazione del rumore di fase indotto dalla fibra ottica (per effetti termici e meccanici) mediante il controllo attivo del campo laser
- Dimostrata la possibilità di confrontare frequenze ottiche con precisioni migliori di 10^{-20} su distanze di centinaia di km
- Diversi link già sviluppati, che utilizzano le infrastrutture esistenti per telecomunicazioni



Atom interferometers and optical clocks

- Inertial sensing with single photon transitions, to reduce the impact of laser frequency noise on long baselines due to finite propagation time.
 - Theoretical proposal for differential scheme: N. Yu and M. Tinto, *Gen. Relativ. Grav.* 43, 1943(2011); S. Dimopoulos et al., *Phys. Rev. D* 78, 122002 (2008)
 - Experimental evidence of atom interferometer with single-photon transition on Sr clock line: L. Hu et al., *PRL* 119, 263601 (2017)
 - High sensitivity sensing with large-momentum transfer using the 689 nm intercombination line in Sr: J. Rudolph et al., arXiv:1910.05459v1 (2019)
 - OLAGS will develop this method for differential measurements over variable baseline up to state-of-the-art sensitivity



Programma

- Primo anno
 - Progetto e sviluppo del sensore atomico
 - Definizione e sviluppo del *link* ottico
 - Progetto dei sistemi di isolamento sismico ed angolare
- Secondo anno
 - *Test* del *link* ottico su scala di laboratorio
 - Sviluppo dei sistemi di isolamento sismico ed angolare
 - *Test* dei componenti critici di ottica atomica
- Terzo anno
 - Test del sensore atomico differenziale
 - Integrazione del sensore atomico con il *link* ottico
 - Studio e mitigazione delle sorgenti di rumore
- Durante il corso del progetto verranno sviluppati modelli per estrazione di dati di interesse fisico (applicazioni di fisica della terra solida e dell'atmosfera, rumore newtoniano, onde gravitazionali, ricerca di dark matter), che nel secondo anno contribuiranno alla definizione della topologia della rete

Ambiti applicativi

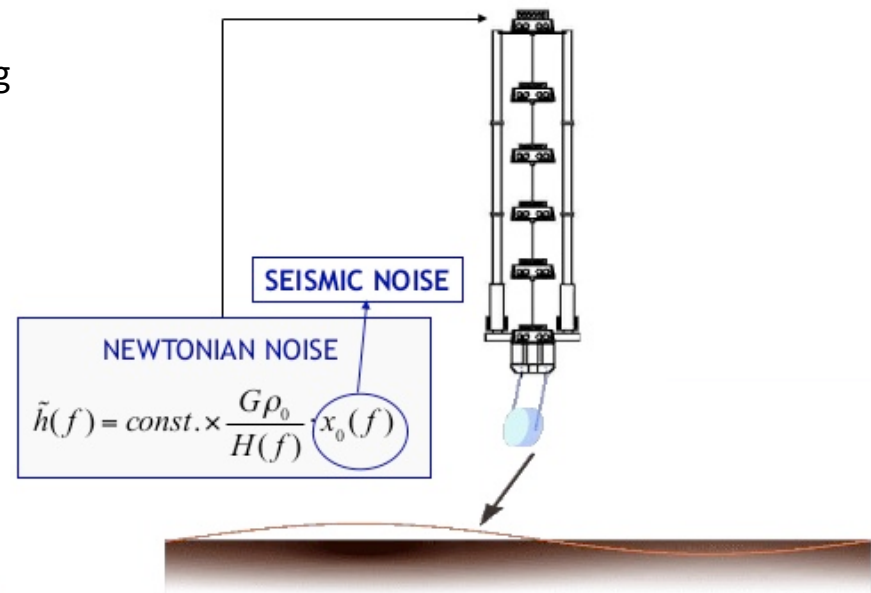
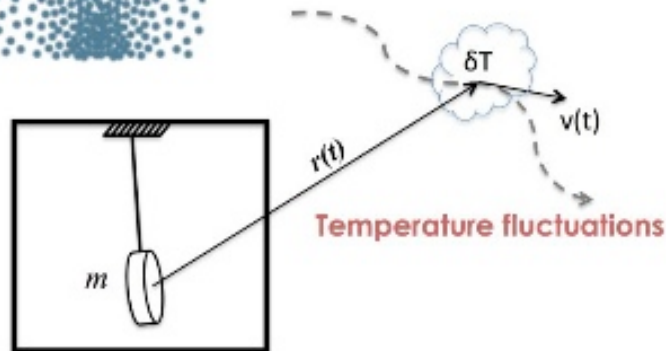
- Fisica terrestre e dell'ambiente
 - Fisica della terra solida
 - Fisica della terra fluida
- Rivelazione di onde gravitazionali
 - Misura del rumore Newtoniano in bassa frequenza per rivelatori di 3° generazione
 - Misura di fondo stocastico tramite modi normali della terra
- Fisica fondamentale
 - Ricerca di Dark Matter
 - Dark energy

Fisica terrestre e dell'ambiente

- Fisica della terra solida
 - Scala globale
 - rivelazione dei modi di Slichter
 - Osservazione dell'Earth Hum
 - Anomalie gravitazionali locali
 - Idrologia degli acquiferi
 - deformazione elastica di corpi rocciosi
 - migrazione di fluidi magmatici-idrotermali in sistemi vulcanici o geotermici
 - Fenomeni sismici
 - Deformazione di corpi rocciosi sotterranei
 - processi fisici di dislocazione di strutture sismogenetiche
- Fisica della terra fluida
 - Oceani
 - sorgenti e propagazione di tsunami
 - dinamiche oceaniche (strutture bentoniche, circolazione termoalina)
 - Atmosfera
 - fisica delle nubi, coalescenza in transizione di fase del vapor acqueo
 - fisica delle nubi e dei processi di coalescenza durante la transizione di fase del vapor acqueo
 - dinamiche atmosferiche in atmosfera stratificata
 - Fluidi endogeni
 - riserve di gas naturale
 - idrologia

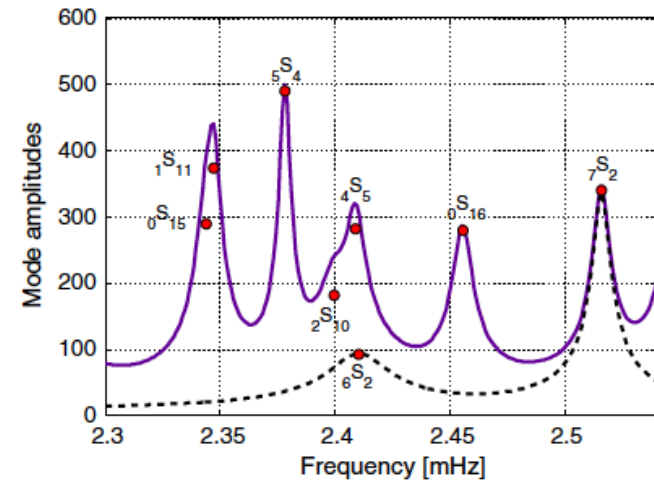
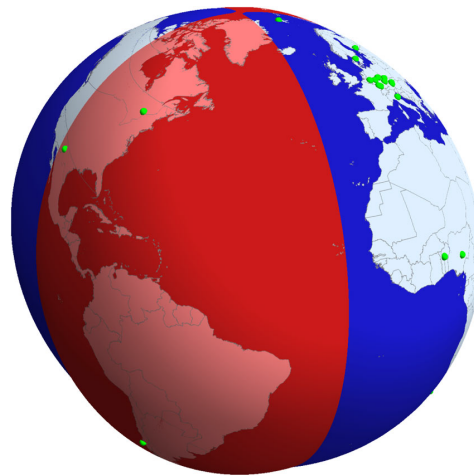
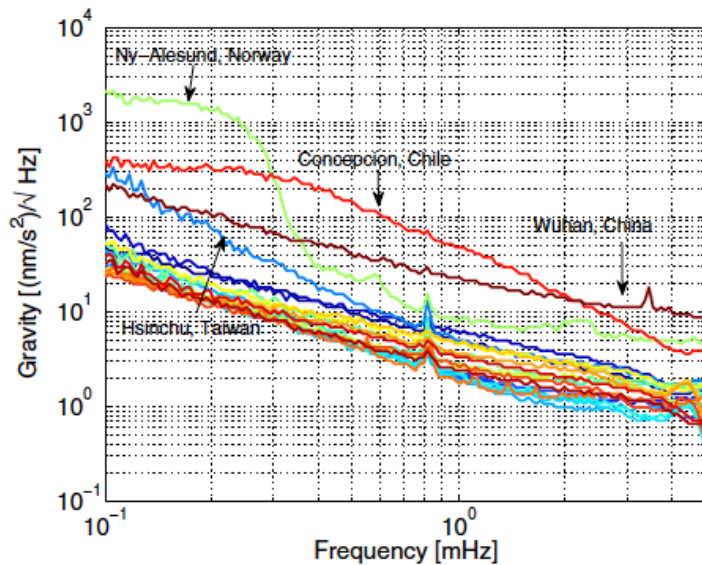
GW detection

- Measurement of low-frequency Newtonian noise (sub-Hz) for third generation GW detectors
 - Current protocols for NN mitigation require a network of seismometers & microphones + a reliable model to compute NN from ground vibration and air pressure fluctuations
 - Gravity gradiometry would allow direct NN sensing



Rivelazione di onde gravitazionali

- Misura del rumore Newtoniano in bassa frequenza (sub-Hz) per rivelatori di 3° generazione
- Misura di fondo stocastico tramite modi normali della terra [M. Coughlin and J. Harms, Phys. Rev. D **90**, 042005 (2014)]



Fisica fondamentale

- Ricerca di Dark Matter

- A. Geraci and A. Derevianko, Sensitivity of Atom Interferometry to Ultralight Scalar Field Dark Matter, PRL 117, 261301 (2016)
- A. Derevianko, Detecting dark matter waves with a network of precision measurement tools, arXiv:1605.09717 (2016)
- P. W. Graham et al., Dark Matter Direct Detection with Accelerometers, arXiv: 1512.06165 (2016)
- A. Arvanitaki et al., Search for light scalar dark matter with atomic gravitational wave detectors, arXiv:1606.04541 (2016)

- Ricerca di Dark Energy

- C. Burrage and E. J. Copeland, Using Atom Interferometry to Detect Dark Energy, arXiv: 1507.07493 (2015)
- P. Hamilton et al., Atom-interferometry constraints on dark energy, Science 349, 849 (2015)

